

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS DE RELEVANCIA DE LA LLANURA PAMPEANA EN EL CENTRO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Eduardo Usunoff¹; Marcelo Varni²; Raúl Rivas³ & Pablo Weinzettel⁴

Resumen - En varias regiones del mundo existen paisajes de escaso relieve superficial, que poseen características hidrológicas poco convencionales. Aunque existe una estricta dependencia del clima, las llanuras que se desarrollan bajo condiciones semi-húmedas son las que ofrecen los mayores enigmas en cuanto al comportamiento de sus recursos hídricos.

Este trabajo presenta las conclusiones de estudios llevados a cabo en la llanura central de la Provincia de Buenos Aires, específicamente la correspondiente a la cuenca del arroyo del Azul. Se presentan evidencias de la regionalización lograda a partir del uso combinado de SIG y del análisis multivariado. Por métodos independientes se demuestra que las formas simples de cálculo de la evapotranspiración real no se ajustan a la realidad. De igual modo, se demuestra el rol fundamental de la zona no saturada en cuanto a su incidencia en la recarga (sujeta a eventos especiales de lluvia y de estado de humedad antecedente, y a la existencia de macroporos). Finalmente, se revela las relaciones hidrológicas entre una laguna y las aguas subterránea donde, a diferencia de lo esperable, existe mayormente un aporte de las aguas superficiales al acuífero.

Palabras clave - hidrología de llanuras, regionalización, balance hídrico.

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras, CC44, 7300 Azul, Argentina. Teléfono-fax 54 2281 432666. eusunoff@faa.unicen.edu.ar

² Instituto de Hidrología de Llanuras, CC44, 7300 Azul, Argentina. Teléfono-fax 54 2281 432666. varni@faa.unicen.edu.ar

³ Instituto de Hidrología de Llanuras, CC44, 7300 Azul, Argentina. Teléfono-fax 54 2281 432666. rrivas@faa.unicen.edu.ar

⁴ Instituto de Hidrología de Llanuras, CC44, 7300 Azul, Argentina. Teléfono-fax 54 2281 432666. paw@faa.unicen.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Desde hace años la caracterización de las llanuras ha ingresado decididamente a la agenda de investigaciones hidrológicas pendientes. Si bien UNESCO (Fuschini Mejía, 1983 y 1989) ha propiciado la ejecución de dos eventos internacionales sobre esta materia, el transcurso del tiempo ha demostrado que el avance relativo en términos de conocimiento ha sido escaso. Puede ello adjudicarse al hecho que las llanuras dilatadas no se encuentran con frecuencia en el mundo. Los ejemplos más acabados se hallan en Australia, Argentina, China, Hungría y en algunos sectores de la planicie costera del sudeste de Estados Unidos.

La metodología convencional de los estudios hidrogeológicos surgió en Europa y tuvo luego un notable desarrollo en Estados Unidos y Canadá. En cualquier caso, los escenarios típicos de aplicación de sus métodos y/o técnicas supone una morfología que asegura la delimitación de cuencas y pendientes superficiales apreciables. Este último aspecto, y con frecuencia también el primero, están ausentes en las llanuras. A partir de esas características se definen comportamientos hidrológicos diferentes con respecto a aquellos que se dan en los paisajes típicos. Kovacs (1983) indica que la atipicidad de las llanuras es evidente, y que su estudio puede efectuarse mejor cuando las mismas se sitúan en regiones de climas semi-húmedos a semi-áridos (en climas secos son asimilables a desiertos, y en climas húmedos se convierten en humedales). Es también cierto que en climas semi-húmedos, las llanuras del mundo son el sostén de actividades productivas de gran relevancia económica que se fundamentan en la disponibilidad de recursos hídricos.

Damiano et al. (1989) han sintetizado las características singulares de las llanuras, como se muestra en la Tabla 1, apuntando exclusivamente a elementos significativos desde el punto de vista hidrológico. Las consecuencias de lo detallado en la Tabla 1 pueden consultarse en Usunoff et al. (1999), aunque en este trabajo se retomarán varios de los aspectos determinantes.

El objetivo de este trabajo, basado en las experiencias de los autores en la cuenca del arroyo del Azul (centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina), es el de presentar un modelo conceptual de funcionamiento hidrológico de una llanura a partir de consideraciones especiales que hacen a:

- la subdivisión del dominio espacial en elementos que tengan en cuenta varios parámetros de interés (además de la pendiente del terreno), evadiendo de esa manera el simple concepto de cuenca alta, media y baja,

- el tratamiento del término de evapotranspiración real en los balances de agua, sin caer en simplificaciones que probadamente no se ajustan a la realidad,
- el rol de la zona no saturada como determinante de las condiciones de recarga de los acuíferos freáticos someros, y
- las relaciones entre las aguas subterráneas y las innumerables depresiones portadoras de agua que se encuentran con frecuencia en las llanuras.

Atributo	Paisaje con relieve	Paisaje llano
Superficie tributaria (cuenca)	Definida	No bien determinada
Punto de descarga	En general, único	Múltiple
Energía morfológica	Alta	Baja
Drenaje superficial	Organizado y jerarquizado	Anárquico
Flujos de agua horizontales	Muy importantes	Poco importantes
Flujos de agua verticales	Mediano a poco importantes	Determinantes
Pendientes superficiales	Mayores a 0,5 %	Menores a 0,1 %
Impacto de la acción antrópica	Bajo a medio	Alto
Tiempo de respuesta a un estímulo pluvial	Generalmente corto	Largo
Respuesta en el punto de descarga ante un estímulo pluvial	Rápido y en fase	Lento a nulo
Dirección de escurrimiento superficial	Invariable	Variable

Tabla 1. Características diferenciales de los paisajes llanos y los paisajes con relieve.

LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo del Azul se ubica aproximadamente en el centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1), en la denominada popularmente pampa húmeda, y sobre la cual se llevan a cabo prácticas agropecuarias (cultivos de cereales y oleaginosas, ganadería bovina de cría e invernada) cuyos beneficios representan una porción sustancial del PBI nacional. Está formada por una extensa área llana (cuenca baja) y una restringida zona serrana (cuenca alta) donde se sitúan las nacientes del arroyo del Azul. El área serrana y la llana están conectadas por una zona pedemontana semiplana (cuenca media). Para la cuenca alta las pendientes superficiales son del orden del 5%, 0.1% y aún menores para la cuenca baja, y entre 0.5 y 0.8% para la cuenca media. A su paso por la ciudad de Azul, el arroyo tiene un caudal medio de 1.2 m³/s, de los que la

aproximadamente la mitad corresponde a caudal básico. La precipitación media anual ronda los 900 mm, con una temperatura media anual de 14 °C.

Los afloramientos del basamento hidrogeológico se encuentran en el extremo sur de la cuenca, y se corresponden con rocas metamórficas, tonalitas, migmatitas y cuarcitas (González Bonorino et al. 1956). Tales rocas se profundizan a lo largo del eje longitudinal de la cuenca y, por ejemplo, a la altura de la ciudad de Cacharí se las detecta a una profundidad de 500 m. Sobre este basamento se disponen sedimentos cuaternarios, que Fidalgo et al. (1975) denominan Pampeano y Pospampeano. El Pampeano se caracteriza por limos castaño rojizos frecuentemente cementados con carbonatos. Lo cubren los materiales del Pospampeano, que son mayormente limos arenosos de origen eólico y otros sedimentos de granulometría similar de origen fluvial y lacustre.

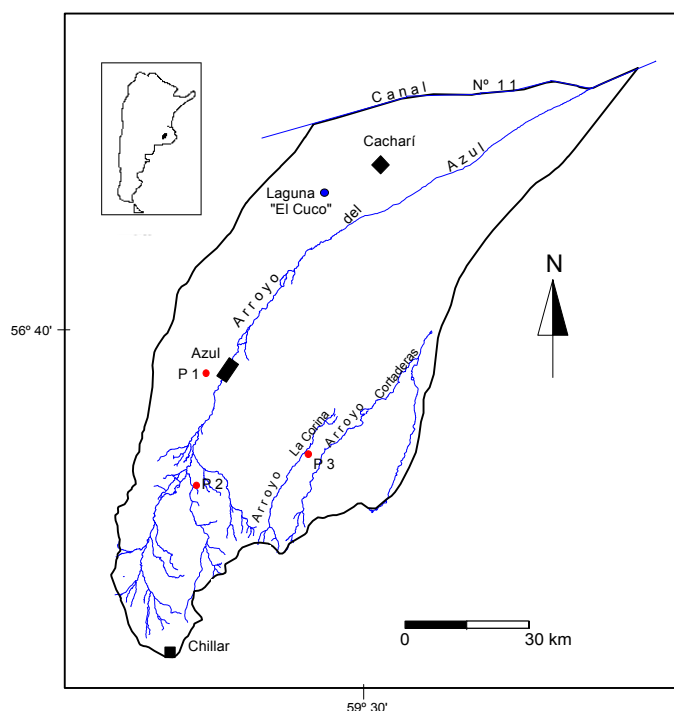


Figura 1. Ubicación de la cuenca del Azul, parcelas experimentales y cuerpo de agua.

El acuífero regional es verticalmente heterogéneo en virtud de los eventos de deposición sedimentaria que le dieron origen. Sin embargo, su comportamiento a la escala del trabajo permite considerarlo como un sistema único, libre, y sin variaciones potenciométricas importantes con la profundidad. Sala et al. (1987) lo definen como un acuífero multiunitario.

LA CONSIDERACIÓN DE ÁREAS ECOLÓGICAS HOMOGÉNEAS

Varios eventos científicos de la última década, principalmente auspiciados por la International Association of Hydrological Sciences (IAHS), han permitido asentar el concepto que la regionalización es una subdivisión metodológica válida de la hidrología científica y aplicada. Beran et al. (1990) lista tres actividades que la regionalización permite a los hidrólogos: (1) ordenar y entender sus observaciones, (2) construir modelos a la escala de la cuenca a partir del conocimiento y de los datos recogidos a escalas menores, y (3) hacer predicciones en sitios donde los datos hidrológicos no se conocen o son inadecuados.

Las unidades ecológicamente homogéneas surgen del análisis de la mayor cantidad de información disponible sobre el paisaje o región de estudio. Este concepto supone que se incluyen variables pertinentes y que se evita la inherente subjetividad. Gallopín (1982) acota que una metodología objetiva para la regionalización consiste en la subdivisión del área de estudio en Elementos Ambientales Unitarios (EAU), con un posterior agrupamiento de los mismos en base al análisis multivariado. Estas EAUs conforman la unidad mínima considerada, y resulta internamente homogénea con respecto a las características seleccionadas. Para la división del dominio en EAUs pueden emplearse unidades irregulares (basadas en conocimientos previos o en inferencias de la realidad) o unidades geométricamente regulares (artificiales). Generalmente, se opta por esta última alternativa para evitar sesgos que pongan en peligro la objetividad del análisis.

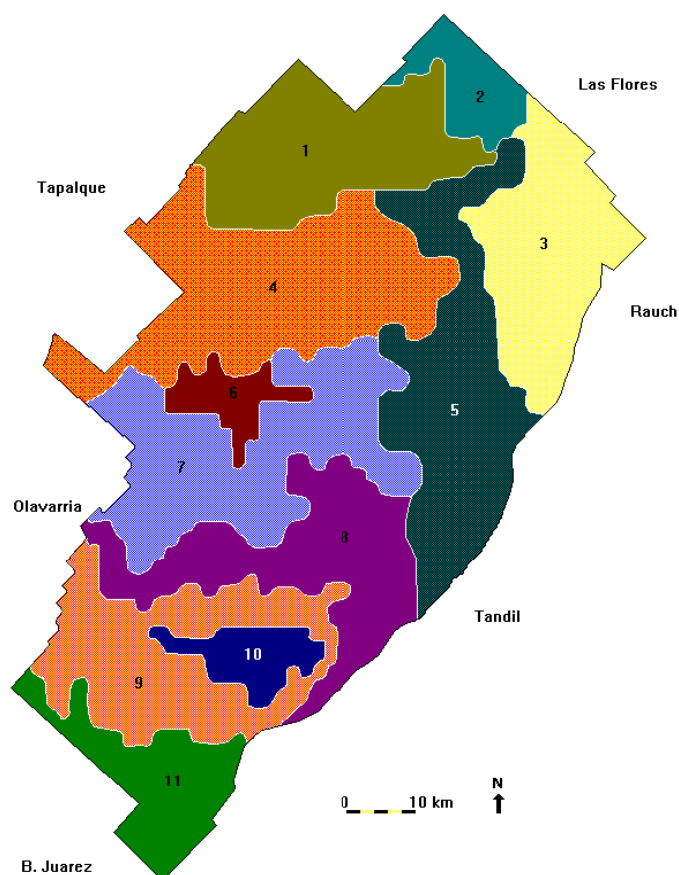


Figura 2. Mapa de regiones ecológicamente homogéneas en el partido de Azul.

En la cuenca estudiada, esta tarea fue abordada por Entraigas (1995). El área seleccionada se correspondió con la traza de la cuenca del arroyo del Azul dentro del partido homónimo. Las EAU's provinieron de la superposición de una grilla regular al área de interés coincidente con la cuadrícula de escala 1:50000 de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar Argentino. Para la zona tratada, esto derivó en la obtención de 1041 celdas de 4 km². En cada una de las EAU's se definió un valor para las siguientes variables: siete de tipo fisiográfico (ambiente serrano, periserrano, ondulado de piedemonte, de llanuras aluviales, de planicie de derrames, de acumulación-deflación, y afloramientos rocosos), dos hidrológicas (espesor de la zona no saturada y conductividad eléctrica de las aguas subterráneas), una biológica (cobertura vegetal media anual), dos climáticas (precipitación media anual e índice de anegamiento), cuatro edáficas (suelos Natracuoles, Argiudoles, Natracualfes y Hapludoles líticos), dos topográficas (pendiente y orientación de la misma), y una última variable que refleja la accesibilidad vía rutas o caminos rurales. Cada una de estas variables se volcaron en mapas temáticos, para lo que el uso del programa ILWIS (ITC, 1993) fue de fundamental importancia, tanto para el almacenamiento de los datos como para la interpolación para el llenado de la matriz de

datos en los sitios sin información medida. En definitiva, la base de datos constó de 19 columnas (las variables mencionadas) y 1041 filas (las EAUs). El tratamiento posterior involucró la aplicación del método de componentes principales (Harman, 1976), previa normalización de las variables (Howarth y Earle, 1979), mediante el paquete estadístico SAS (SAS, Inc., 1992). Una vez obtenidos los pesos de cada variable en cada componente principal (se extrajeron 3 componentes principales, que explican el 81% de la varianza de la matriz de datos de partida), se aplicó el concepto de escores factoriales (Harman, 1976) para volcar los datos al plano de la región de interés. Vale aclarar que se efectuó la validación de las EAUs agrupadas en una misma región homogénea en base a la técnica de Andrews (1972). Una última tarea consistió en efectuar la composición de una imagen única que contuviese los resultados del análisis, de lo que se obtuvieron 11 regiones ecológicamente homogéneas (Figura 2). Este resultado, cuyos detalles pueden consultarse en Entraigas (1995), revelan que en esta cuenca de llanura la subdivisión en ambientes no responde estrictamente a la clásica consideración de una zona alta, una intermedia, y una baja, sino que hay elementos adicionales que permiten acceder a una zonificación más sutil y completa de cara a aplicaciones diversas. Entraigas (1995) describe, por ejemplo, la aplicación de estos resultados a la estimación del valor económico de las áreas identificadas (es decir un modelo predictivo donde el valor es la variable dependiente definida a partir de las 19 variables consideradas); un segundo ejemplo consistió en la simulación del caudal del arroyo Azul a su paso por la ciudad en los eventos de inundación que se produjeron en Mayo y Junio de 1993.

LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LAS LLANURAS

Aunque las generalizaciones numéricas son difíciles, sí debe aceptarse la noción que en los ambientes de llanuras sub-húmedas la evapotranspiración real (ER) constituye la componente de mayor peso en el balance hidrológico regional. Desafortunadamente, la obtención de valores confiables de ER es metodológicamente muy complicada. Quizás más alarmante es el hecho que en muchas ocasiones se usan estimadores que probadamente no funcionan, y que conducen a graves errores en posteriores aplicaciones destinadas a gestionar el supuestamente “disponible” recurso hídrico. Donde la ER alcanza valores del orden del 90% de las precipitaciones, su estimación sujeta a errores hace que se desvirtúe el significado numérico de los restantes componentes del balance.

Para la cuenca del arroyo del Azul, Varni y Usunoff (1999) demuestran que la metodología frecuentemente empleada (estimación de la evapotranspiración potencial por

la fórmula de Thorhthwaite, y aplicación del método de Thornthwaite-Matter para obtener la ER) conduce a groseras subestimaciones de la ER y, consecuentemente, incrementa artificialmente la recarga del acuífero freático. Lo propio informan Navarro Dujmovich et al. (1992) para la misma zona de estudio. Por esta razón, se ha intentado una estimación de la ER basada en métodos independientes. Como tales, se han seleccionado: (a) la consideración de balances de masa del ión cloruro, y (b) la modelación numérica. Los resultados pueden consultarse en Varni et al. (1996), Varni et al. (1999), y Varni y Usunoff (1999). Resultados similares para una cuenca vecina se consignan en Varni et al. (1998).

De los trabajos citados se destaca que la ER para la cuenca estudiada está en el orden del 90% de las precipitaciones, y que la recarga del acuífero regional está en el rango del 10% del ingreso por lluvias. Es también importante reconocer que tal recarga está discretizada arealmente (mayor en la cuenca alta, y decreciendo hacia la cuenca baja, en estricta dependencia con el tipo de suelo superficial y el uso de la tierra) y con un patrón de distribución temporal que determina que sólo los eventos pluviométricos mayores (o aquellos que encuentran a la zona no saturada con buen contenido de humedad) determinan la existencia de recarga. En estudios del comportamiento de la zona no saturada de suelos representativos de la cuenca, Weinzettel y Usunoff (1998, 1999) llegan a las mismas conclusiones de forma metodológicamente independiente.

En síntesis, de aceptarse estos resultados, los gestores de los recursos hídricos regionales deben tener en cuenta que los volúmenes anualmente renovables del acuífero son sustancialmente menores que los consignados en estudios previos (Sala et al., 1987, por ejemplo), que apelaron a métodos simplificados de estimación de la ER.

EL COMPORTAMIENTO DE LA ZONA NO SATURADA EN ÁREAS DE LLANURAS

En la cuenca del arroyo del Azul se observan dos zonas bien definidas por los tipos de suelo que se presentan, y el uso que se le da a los mismos (Figura 1). En la parte sur de la cuenca y hasta la latitud de la ciudad de Azul predominan los suelos Argiudoles y Hapludoles (Gandini y Entraigas, 1995) los cuales son muy productivos y tienen un fuerte uso agrícola-ganadero. Están bien estructurados, permiten buen drenaje y cuentan con buena proporción de materia orgánica. En la parte norte de la cuenca predominan los suelos Natracuoles y Natracualfes, que presentan deficiencias para la infiltración del agua; en esta zona domina la actividad ganadera y la vegetación está compuesta mayormente por pastos naturales.

En general en toda la cuenca se observa, a pocos centímetros de profundidad o aflorante y hasta los tres metros de profundidad aproximadamente, una costra calcárea cementada que recibe el nombre de tosca. Se presenta a menudo en mantos que pueden ser de pocos centímetros de espesor hasta espesores cercanos al metro. La tosca presenta cierta continuidad en la cuenca, y dependiendo de su compacidad, es más o menos permeable produciendo localizadamente problemas de drenaje del suelo al demorar la infiltración del agua.

En el sector de la cuenca media y alta, en suelos Argiudoles, se han instrumentado tres parcelas experimentales para la caracterización hidrodinámica de la zona no saturada, que se hallan separadas unos 30 km una de otra.

El especial interés en conocer las características de la zona no saturada en el área de suelos Argiudoles se debe principalmente a que, en ese sector de la cuenca es donde se produce la mayor recarga al acuífero regional (Varni et al., 1997). Los suelos son Argiudoles típicos, con textura franco limosa a arcillosa en el horizonte A, el horizonte B es en general arcilloso y se presenta después de los 30 cm de profundidad, el horizonte C se encuentra a partir de los 80 cm y es de textura franco arcillosa o franco limosa. Las parcelas presentan tosca a partir del metro o a los dos metros de profundidad según la ubicación de la parcela.

La infiltración del agua se produce por la matriz del suelo así como también por flujos preferenciales (Beven y Germann 1982) que producen el bypass de la matriz del suelo. Ensayos realizados con un infiltrómetro de tensión (Peroux y White, 1988), en la parcela número uno, demuestran un importante porcentaje de macroporosidad en la primera parte del perfil del suelo (Weinzettel y Usunoff, 1999), vinculado especialmente a las raíces de la vegetación natural presente. En la misma parcela, ubicada en cercanías a la ciudad de Azul, se han obtenido muestras de agua de la zona no saturada mediante cápsulas de succión desde los 30 cm de profundidad hasta los 150 cm, cada 30 cm. En las muestras obtenidas se realizó el análisis del ión conservativo cloruro (Weinzettel y Usunoff, 1998). En el período de mediciones el nivel acuífero osciló entre 2 y 2.5 metros de profundidad. Las cápsulas de muestreo se mantuvieron a valores de succión de 60 a 80 centibares durante períodos de una a dos semanas, obteniéndose de todas o de algunas cápsulas la muestra correspondiente. Según Magid y Christensen, 1993, a esa tensión y por la teoría de capilaridad las cápsulas pueden muestrear agua de poros pequeños de hasta 5 μm . En el período de muestreo (seis meses), se obtuvieron de 6 a 10 muestras para el análisis del citado ión. En los valores obtenidos se observa una reducción en la concentración de

cloruro en el acuífero respecto del valor obtenido en el muestreador de 150 cm. Esta menor concentración de cloruro en el acuífero estaría indicando que una parte del flujo se produce por vías preferenciales (Allison et al., 1994).

Debido a estos antecedentes de flujo preferencial se deberá tener especial cuidado al momento de realizar el cálculo de la recarga por balance del ión cloruro en la llanura, ya que se debe contar con alguna ponderación del flujo preferencial y del flujo matricial. Una metodología para abordar este problema es indicada por Sharma y Craig (1989).

Otras evidencias de flujo preferenciales fueron abordadas por Weinzettel y Usunoff (1998), al verificarse que en el momento de producirse lluvias importantes que producen recarga del acuífero, el nivel freático asciende rápidamente antes de que tanto los registros de humedad como los de la tensiometría indiquen la saturación de la matriz del suelo. Un punto a tener en cuenta en la infiltración, es el comportamiento ejercido por la tosca, que en sectores como el de la parcela uno se presenta en mantos discontinuos a distintas profundidades a partir del metro de profundidad.

De la comparación de los registros de tensiometría y humedad de la zona no saturada y de la freatimetría, puede observarse que la recarga en general se produce en determinados momentos, cuando eventos de importante pluviometría producen el humedecimiento del perfil del suelo y la infiltración del agua hacia el acuífero. Por otra parte se le suma a esto, el agua que infiltra a través de vías preferenciales y macroporos.

Otra consideración a tener en cuenta es la profundidad a la que se encuentra el nivel freático al momento de producirse las lluvias. Se ha observado, como es lógico en los registros de las parcelas, que cuanto más somero se encuentra el nivel freático la recarga se produce con lluvias poco importantes, llegando en algunos casos, donde el nivel está muy somero, a producirse rechazo de la recarga. Este efecto se debe a que, con niveles cercanos a la superficie, se produce una más rápida llegada del agua de percolación ya que se reduce el volumen de agua necesario para completar el almacenamiento. Por otra parte la macroporosidad es mayor en la primera parte del perfil del suelo por ser la zona con mayor densidad de raíces. Se puede inferir que cuando el acuífero se presenta a escasa profundidad el efecto del flujo por macroporos es más importante que con niveles más profundos.

ACUMULACIONES DE AGUA SUPERFICIAL EN LAS LLANURAS

En la denominada Pampa Deprimida el relieve es sumamente llano y abundan pequeñas depresiones que, dadas las características de subhúmeda a húmeda de la llanura, están colmadas de agua gran parte del año y marcan en el paisaje un sinnúmero

de cuerpos de agua de variadas dimensiones (Figura 3). Estas depresiones juegan un papel fundamental en el balance hídrico del acuífero freático según funcionen como puntos de recarga o descarga de las aguas subterráneas. Esta es la razón por la cual se ha iniciado un estudio de las interacciones de estos cuerpos de agua con el acuífero freático.



Figura 3. Imagen Landsat TM5 (Banda 5) correspondiente a marzo de 1998. Al centro de la imagen cambian las condiciones de pendiente y suelos y, por consiguiente, de drenaje. En la zona norte puede observarse gran cantidad de cuerpos de agua con diferente grado de interconexión.

El tamaño de estos cuerpos es desde algunas decenas o centenas de metros hasta 2 ó 3 km de diámetro o eje mayor, mientras que las profundidades son raramente mayores a 4 metros y en su gran mayoría inferiores a los 2 metros (Fidalgo, 1983). Son de formas bien definidas (Dangavs, 1998).

Su alimentación es diversa, dependiendo fundamentalmente de la extensión de su área de aporte superficial. No es aquí casual la utilización del término área en lugar de

cuenca de aporte: ello se debe a que no existe una cuenca definida y que el área que aporta aguas superficiales a la laguna depende del estado de humedad de la zona. En efecto, en estado de “aguas altas” las depresiones se interconectan formando redes de flujo de tipo lineal de importante longitud mientras que en períodos más secos las depresiones se hallan aisladas y sólo reciben aguas superficiales de su entorno. No es válido, por lo tanto, el concepto de cuenca en el sentido clásico. Por otra parte, el nivel freático se halla muy cercano a la superficie del terreno por lo que también puede aportar aguas a la laguna. Entonces, la laguna puede estar alimentada por aguas superficiales o subterráneas solamente, o por una combinación de ambas, dependiendo de las condiciones de humedad.

El origen de las cubetas es diverso y casi nunca los procesos son únicos, sino que muchas veces se reconoce la superposición de dos o más acciones geomorfológicas. No obstante, es posible señalar que el proceso dominante es esencialmente deflacionario, con menor frecuencia la génesis esta ligada a cauces fluviales preexistentes y, finalmente, tampoco faltan los ligados a un origen tectónico. Esta morfología, que controla los procesos hidrológicos, es heredada de un clima diferente al actual, donde ha dominado un ambiente desértico.

En sentido puramente limnológico, las lagunas bonaerenses son equiparables con el *pond* (inglés), el *étang* (francés) y el *teich*, *thumpel* y *weiher* (alemán) (Ringuelet, 1962). Ello se debe a que la diferencia fundamental entre una laguna y un lago clásico no es su extensión sino su profundidad y las lagunas de la provincia de Buenos Aires son someras.

Desde el punto de vista de su estructura y función, las lagunas bonaerenses son de carácter eutrófico. Esta organización ecológica está íntimamente relacionada con las condiciones físico-químicas, hidrológicas, climáticas, bióticas e históricas de la Pampasia (Dangavs, 1998).

Se ha adoptado para su estudio un cuerpo de agua ubicado en la cuenca del arroyo del Azul (Figura 1), a unos 40 km al norte de la ciudad homónima, y se lo conoce como laguna “El Cuco” (59° 42’33” W y 36° 27’45” S). Cubre un área de 30 hectáreas y alcanza una profundidad máxima de 1,20 m. Existe un cauce de régimen temporario que descarga sus aguas en ella y otro en el que descarga sus aguas al alcanzar su nivel máximo.

En la Figura 4 puede verse el registro de niveles en la laguna y en el piezómetro para el año 1998, así como las precipitaciones medidas en cercanías de la laguna. Se muestran sólo los registros de un año con fines de claridad, aunque el comportamiento general debe considerarse como representativo de los cuatro años de mediciones. Todos

los niveles están referidos al mismo sistema de referencia arbitrario. Puede observarse que los niveles de la laguna están casi continuamente por encima del nivel freático, especialmente en los períodos en los cuales los niveles (freático y del cuerpo de agua) permanecieron relativamente bajos. En los momentos en que se producen importantes precipitaciones los niveles se elevan significativamente, pudiendo alcanzar la laguna su nivel de descarga lo que produce un rápido descenso de su nivel. En esos cortos períodos el nivel freático puede superar a la laguna.

La química de las aguas subterráneas y de la laguna confirman el hecho de que el cuerpo de agua esta alimentado fundamentalmente por agua superficial.

Se ha realizado un análisis de las curvas de agotamiento o recesión de la laguna y de las aguas subterráneas. Estas curvas responden a una ecuación de tipo exponencial (Custodio y Llamas, 1983). Se analizaron los exponentes de dicha ecuación para la laguna y el agua subterránea durante varios períodos. Se obtuvieron valores que se mantienen sumamente estables. El exponente obtenido para la laguna es $6 \cdot 10^{-4}$ y para el agua freática $1 \cdot 10^{-3}$. Esto implica descensos más pronunciados para esta última que para la laguna, tal como se ve en la Figura 4.

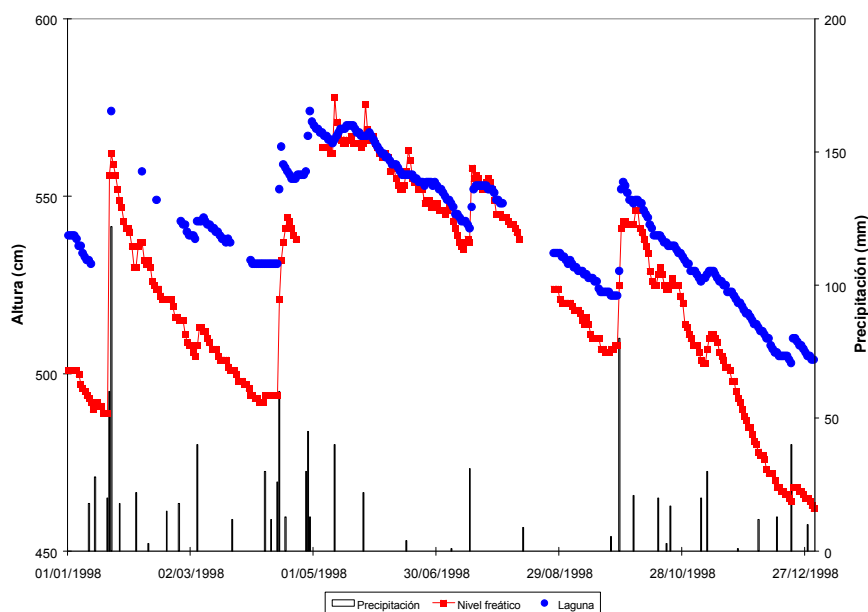


Figura 4. Niveles en la laguna, en el piezómetro y precipitaciones para 1998.

También se ha medido el nivel del acuífero bajo el cuerpo de agua, a 1 m por debajo del fondo. Los niveles registrados estuvieron por debajo del pelo de agua de la laguna, con desniveles medios menores al decímetro (Varni y Rivas, 1999).

Mediante un medidor de flujo instalado en el fondo de la laguna (Lee, 1977; Carrera Ramírez, 1997) se determinaron caudales salientes hacia el acuífero. Suponiendo representativos los valores registrados como caudal medio a través de la totalidad del fondo, se obtendría un pasaje de agua medio desde toda la laguna al medio subterráneo de 1,9 m³/día (válido para el período de registro).

Dado que el sedimento depositado en el fondo de la laguna alcanza un espesor aproximado de 0,30 m en las cercanías del piezómetro, se ha aplicado la ley de Darcy para estimar la conductividad hidráulica del material del fondo de la laguna a partir de los niveles de la laguna y los del agua subterránea y los flujos determinados con el medidor de infiltración. Se ha obtenido un valor de $1,6 \cdot 10^{-4}$ m/día

En resumen, los niveles en la laguna están casi la totalidad del tiempo por encima del nivel freático en el sector analizado. La diferencia de energía hidráulica entre la laguna y las aguas subterráneas inmediatamente debajo de ella se produce por una capa de sedimentos arcillosos de una permeabilidad muy baja. El nivel freático supera el nivel del cuerpo de agua solamente en los momentos en que está descargando sus aguas, y este desnivel dura pocas horas, ya que el descenso de las aguas subterráneas es muy rápido.

CONCLUSIONES

Este trabajo intenta resaltar las particularidades hidrológicas de las regiones llanas, en particular aquellas relacionadas con la obtención de estimaciones de los términos del balance hídrico. Las conclusiones más relevantes pueden resumirse como sigue:

- En las llanuras extensas es en ocasiones dificultoso establecer los límites de las cuencas y, aún aceptando límites arbitrarios, dentro de la zona de interés no resulta apropiado la concepción simple de cuenca alta, media y baja. Ello, al menos en la cuenca del arroyo del Azul, se ha superado mediante la consideración de áreas ecológicamente homogéneas. Los resultados indican que, aunque la subdivisión clásica es groseramente aceptable, las aplicaciones se enriquecieron por la consideración de nueve subdominios que atienden a los datos disponibles.
- Los métodos semiempíricos para el cálculo de la evapotranspiración real deben ser erradicados como estimadores de tan importante término en los balances hídricos de regiones llanas húmedas. En general, subestiman la evapotranspiración e, inherentemente, incrementan numéricamente el volumen de recarga a los acuíferos. En estas condiciones, los cálculos de reservas explotables están sujetos

a errores considerables. Más aún, la eventual recarga no está distribuida homogéneamente a lo largo del año y no responde directamente al régimen de precipitaciones.

- Según los estudios en marcha de la zona no saturada de los suelos más conspicuos de la cuenca, y en apoyo de la conclusión anterior, se verifica que sólo eventos discretos de lluvia en suelos con alta humedad antecedente pueden llegar a producir elevaciones del nivel freático. Adicionalmente, se ha estimado la presencia de flujo preferencial, a través de mediciones concomitantes de humedad de los horizontes del suelo y las fluctuaciones del nivel freático y también por evidencias del contraste químico de las aguas en tránsito por la ZNS y aquella que recibe el primer decímetro del acuífero libre somero.
- La presencia de innumerables cuerpos de agua someros, con origen en procesos morfogenéticos, agrega una fuente de almacenamiento superficial que incide fuertemente en los balances de agua. Suele afirmarse que tales cuerpos de agua son la expresión de puntos de descarga de las aguas subterráneas, aunque las evidencias aquí presentadas indican que en buena parte del año la situación es exactamente la opuesta.

Las anteriores conclusiones expresan características importantes de las llanuras en las que, en el caso de la cuenca del arroyo del Azul, se han logrado avances promisorios pero en los cuales debe trabajarse mucho más. Sin duda existen muchos otros aspectos de gran importancia que no se tratan en este trabajo, que no pretende ser totalmente abarcativo. Entre ellos, debe mencionarse especialmente la aplicación de técnicas de sensoramiento remoto es una de las herramientas que se muestran hoy como de importancia fundamental para el estudio de llanuras extensas.

De lo dicho a lo largo del trabajo se puede ver que la hidrogeología no se puede tratar aislada de los procesos que se dan en la zona no saturada y del agua superficial. Esto es válido para cualquier ambiente, pero sin duda en las llanuras su importancia es relevante. Por lo tanto, para el estudio del agua en estos ámbitos es imprescindible un encuadre de los procesos desde un punto de vista multidisciplinario.

BIBLIOGRAFÍA

- Allison, G., G. Gee y S. Tyler, 1994. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. *Soil Science Society of America Journal*, 58:6-14.
- Andrews, D., 1972. Plots of high dimensional data. *Biometrics* No. 28, pp. 125-136.
- Beven, K. P. Germann, 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18 (5):1311-1325.
- Carrera Ramírez, J., 1997. Observación y medida de la recarga (descarga) a partir de aguas superficiales y conducciones, transferencias y fugas. En: Custodio, E., Llamas, M.R., y Samper, J. (Ed.) *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*, , 229-245.
- Custodio, E. y M. Llamas, 1983. *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, Barcelona.
- Damiano, F., N. Fernández, G. Parodi y G. Rébora, 1989. Manejo del agua pluvial en la zona Deprimida del Salado. *Manejo del Suelo y Aguas en las Llanuras Argentinas*, INTA-CONAPHI, pp. 133-166.
- Dangavs, N., 1998. Los ambientes lénticos de la Pampasia Bonaerense, República Argentina. En: Fernández Cirelli, A. (Ed.) *Agua: Problemática Regional*, 145-150, Buenos Aires.
- Entraigas, I., 1995. Delimitación de áreas ecológicas homogéneas. Informe de Beca de Perfeccionamiento, Instituto de Hidrología de Llanuras, 67 p.
- Fidalgo, F., 1983. Algunas características de los sedimentos superficiales en la cuenca del salado y en la pampa ondulada. *Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras*, Actas II: 1045-1057.
- Fidalgo, F., R. Pascual y F. De Francesco. 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense (Argentina). *Actas del VI Congreso Geológico Argentino*, pp. 103-138.
- Fuschini Mejía, M. (Ed.). 1983. *Hidrología de las grandes llanuras*. Proceedings del Coloquio de Olavarría, PHI-UNESCO.
- Fuschini Mejía, M. (Ed.). 1989. *Hidrología de las grandes llanuras*. Proceedings del Coloquio de Buenos Aires, PHI-UNESCO.
- Gallopín, G. 1982. Gallopín, G. C. 1982. Una metodología multivariable para la regionalización ambiental-I. *Bases Metodológicas. Ecología Argentina*, Nº 7, 161-76.
- Gandini, M. y I. Entraigas, 1995. *Ecoregiones del partido de Azul*. U.N.C.P.B.A.; Facultad de Agronomía. 15 p.

- González Bonorino, F., R. Zardini, M. Figueroa y T. Limousin, 1956. Estudio geológico de las sierras de Olavaria y Azul (Provincia de Buenos Aires). LEMIT, Serie 2, No. 63, pp. 5-23.
- Harman, H., 1976. Modern Factor Analysis. University of Chicago Press, Chicago, 487 p.
- Howarth, R, y S. Earle, 1979. Application of a generalized power transformation to geochemical data. *Mathematical Geology* 11(1):45-62.
- ITC, 1993. The Integrated Land and Water Information System, ILWIS 1.4. User's manual. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Holanda, 191 p.
- Kovacs, G., 1983. General principles of flat-land hydrology. *Hydrology on Large Flatlands, Proceedings of the Olavarría Symposium, PHI, UNESCO, Vol. 1*, pp. 297-355.
- Lee, D.R., 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology and Oceanography*, 22: 140-147.
- Magid, J. y Christensen, N., 1993. Soil solution sampled and without tension in arable and heathland soils. *Soil Science Society of America Journal* 57:1463-1469.
- Navarro Dujmovich, M., M. Varni e I. Entraigas, 1992. Convalidación del modelo de Morton para estimar la evapotranspiración real areal de la cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Actas del I Congreso Iberoamericano de Meteorología, Tomo II*, pp. 137-141.
- Perroux, K. y I. White, 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52:1205-1215.
- Ringuelet, R., 1962. *Ecología acuática continental*, EUDEBA, 137 p., Buenos Aires.
- Sala, J., E. Kruse y R. Aguglino, 1987. Investigación hidrológica de la cuenca del arroyo Azul, provincia de Buenos Aires. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, La Plata, Informe 37, 235 p.
- SAS, Inc., 1992. SAS/STAT Guide for Personal Computers, Version 6. SAS Institute, Inc., Cary, 378 p.
- Sharma, M. y Craig, A., 1989. Comparative recharge rates beneath banksia woodland and two pine plantations on the Gngangara mound, western Australia. Pp. 185-196 en: Sharma, M.L. (ed.). *Groundwater Recharge*. A. A. Balkema. Rotterdam, 322 p.
- Usunoff, E. M. Varni, P. Weinzettel, y R. Rivas, 1999. Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 110(4):391-406.
- Varni, M. y R. Rivas, 1999. Relación entre aguas superficiales y subterráneas en un cuerpo de agua en la llanura bonaerense. *Actas de las VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, pp. 337-344.

- Varni, M. y E. Usunoff, 1999. Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. *Hydrogeology Journal* 7(2):180-187.
- Varni, M., E. Usunoff y P. Weinzettel, 1998. Estimación de la recarga y de la transmisividad mediante la simulación del flujo de agua subterránea en el ámbito urbano y alrededores de la Ciudad de Olavarría, Argentina. *Memorias del 4° Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Vol. 3, pp. 1488-1503.
- Varni, M., E. Usunoff, P. Weinzettel, y R. Rivas, 1999. The groundwater recharge in the Azul aquifer, central Buenos Aires Province, Argentina. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 24, Part B, N° 4, pp. 349-352.
- Varni, M., R. Rivas, P. Weinzettel, E. Usunoff y D. Arias, 1996. Estimación de la recarga por el método del balance de cloruro en la zona intermedia de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. *Actas de las VI Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, pp. 245-253.
- Weinzettel, P. y E. Usunoff, 1998. Inicio de la caracterización de la zona no saturada en la cuenca del arroyo del Azul. *V Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses*, Actas 2:51-58, Mar del Plata.
- Weinzettel, P. y E. Usunoff, 1999. Evaluación del flujo por macroporosidad con un infiltrómetro de tensión. *VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*, Actas 1:361-368, Santa Rosa.
- Weinzettel, P. y E. Usunoff, 1999. Hidrodinámica de la zona no saturada en suelos argiudoles de la cuenca del arroyo del Azul. En Tineo, A. (Ed.), *Hidrología Subterránea*, Serie de Correlación Geológica N° 13:297-305.